DOI:10.16143/j.cnki.1001-9928.2012.01.016

贾湖骨笛复原新技术研究*

邵錡[1] 方晓阳[1] 潘伟斌[2] 王昌燧[1] 韩庆元[3]

(1. 中国科学院研究生院科技史与科技考古系，北京 100049；2. 河南省考古文物研究所，河南 郑州市 450000；3. 河南省武警总队医院，河南 郑州市 450000)

关键词：骨笛；三维重建；Pro/Engineer

摘 要：贾湖骨笛是迄今为止我国历史上最早、形态完整、现今仍可演奏的吹管乐器，是 9000 ~ 7500 年前中国古代科技文明最重要的实物载体之一。由于骨笛经历数千年的埋藏，出土时多数已经破损。如何对破损的贾湖骨笛进行精确复制，是学界急待解决的难题。我们巧妙地利用 CT 扫描、数据处理、三维模型重建、虚拟复原与激光快速成型技术，复原出与 M494：2 号骨笛实物十分接近复原品。这种利用计算机虚拟修复的思想与技术为破损贾湖骨笛的复原开辟了一条新的技术途径。

Key words: Bone Flute; 3D restoration; Pro/Engineer

Abstract: The Jiahu Bone Flute is an ancient wind instrument; which is excavated at Jiahu Neolithic site, Henan Province, China (BP9000 – 7500) . Because after long time buried, it is hardly found the undamaged bone flute. The essential questions are how the damaged bone flutes can be repaired and how it can be restored accurately. The researchers in a clever way to make up a serial of techniques such as: CT scanning, data processing, 3D restoration, Virtual restoration, laser rapid prototyping, have created a new means that can repair and restore the damaged bone flutes , and used the new method to restore the M494: 2 bone flute. The result shown that the new method can Virtual restore the broken spot in compute and accurate make a copy which has the minimal error compared to the original bone flute. The idea and method can be used to restore and duplicate not only the Jiahu Bone Flute but also the historical relic else.

一、引 言

舞阳贾湖骨笛是迄今为止我国历史上最早、形态完整、现今仍可演奏的吹管乐器，是 9000 ~ 7500 年前中国古代科技文明最重要的实物载体之一。贾湖骨笛的发现不仅在考古学上具有非常重要的学术价值，而且在音乐史、文化史以及古代乐器制作工艺与工具等方面也具有很高的研究价值。然而，经过近万年的地下埋藏，骨笛出土时大多数已有不同程度的断裂与破损。近年来，考虑到骨笛的重要文物价值，舞阳贾湖骨笛已经由相关文博单位作为新石器时代中原音乐文化“活化石”[1]重点收藏保护，直接对原骨笛进行研究，已得不到文物部门的支持。为了对贾湖骨笛的音准、音高等进行研究，一些研究者利用火鸡与鹤的骨骼进行了骨笛的复原和仿制工作[2][3]，我们也曾利用 CT 扫描、Mimics 三维重建与激光快速成型技术对 M511：4 号骨笛进行了精确复原，制造出物理尺寸和音准与贾湖骨笛实物几乎完全相同的复原品[4]。然而这些复原工作都是以少数几根形态比较完整且有测音数据的骨笛为基准开展的，对那些出土时已经破损骨笛如何进行复原，目前尚未见有报道。为此，我们在 M511：4 号骨笛精确复原的基

* 国家自然科学基金资助项目 (10520403)

础上提出了在原工艺中加入立体设计平台PRO/Engineer Wildfire 4.0，对破损的骨笛进行虚拟修复的设想并进行了实验。

二、复　原

1. 样品选择

骨笛样本M494：2于2001年出土，细部特征如封三，1所示。整体成不规则弯曲的弧形，其弧的内割线段全长23.64厘米，骨笛的下部骨管部分较为完整，其上开有七个大小不一的圆形音孔，这七个音孔的排列左右有些错落，呈一个振幅很小的正弦曲线式分布。在骨笛上部，距离吹口一端3厘米处存在大面积折断和破损，后经考古发掘人员临时拼接粘合基本恢复。选择该骨笛作为本次实验修复样品的主要原因：一是该骨笛虽然有较大破损，但破损处轮廓尚能由其他未破损部分的骨管推演得出来，并可由此建立该破损部分的修复曲线。二是该骨笛破损部分的修复很不理想，不仅吹口处有一明显的“V”形缺损未被修补，而且吹口下方骨管破损部分的修补不完整，多处漏气，所以一直吹不响。

2. 数据采集

CT（computed tomography）是电子计算机X射线断层扫描技术的简称，由于CT能在一个横断解剖平面上，准确地探测各种不同组织间密度的微小差别，加之可以做轴位扫描，可以使骨笛横截面形态与几乎所有细节都能在CT图像上纤毫不差地显现出来。因此CT不仅是观察骨笛的外形与内腔结构的非常理想的探测仪器，而且也是重建骨笛三维模型时数据采集的最佳选择。本实验使用的是飞利浦公司出产的64照排的医学CT，选用医学CT的原因一方面对文物的伤害较小，另一方面医学CT的配套重建软件也相对较多，该CT的扫描间距是0.625mm，扫描探头工作电压电流为120kV/246mA，扫描文件以医学影像学标准格式DICOM格式存储，扫描图片一共823张，每张图片大小为125×125mm^2，分辨率为540×540，每个象素占体积0.23×0.23×0.625mm^3。扫描的图像还以骨科透视相片的格式洗印了几张透视相片以备后续工作参考。

3. 数据处理

将经过CT扫描的DICOM图像文件输入到DELL图形工作站里，在Materialise公司的专业的医学CT切片重构软体interactive medical image control system mimics10.01上进行处理。首先是对图像像素按灰度进行定限分离，由于骨笛密度较大，所以灰度值一般较高，我们确定灰度值threshold底限为226，高限为2283，选取灰度居中的点作为要处理的点集mask。然后对该点集mask进行一体化像素区域生长，去除噪声干扰点，把CT机器运算误差造成的游离误差点排除在点集mask外。最后依据除噪后的像素点集进行三维立体计算，选取高质量的图像输出格式，获得了基于mimics软件的M494：2骨笛三维重建模型。由封三，2可见，M494：2号骨笛的立体图与实物在几何尺寸上几乎完全一致，连吹口处的缺损以及自吹口至第一出音孔之间的被修补的破损处都非常明显。然而，由于mimics软件不能对三维重建模型进行修改，因此为了实现对M494：2骨笛破损部分的虚拟修复，我们另辟蹊径，决定在原来的复原工艺中引入立体设计平台PRO/Engineer Wildfire 4.0作为骨笛实体绘制工具，以达到对原破损骨笛进行虚拟修复的目的。

4. 基于PRO/E的三维模型重建

4.1　工具选择

经综合考虑复原精度、三维重构平台的兼容性和操作的简便直观性以及复原成本等因素，我们选择了美国PTC公司去年新出品的立体设计平台PRO/Engineer Wildfire 4.0作为骨笛实体绘制工具。

4.2　导入测量数据文件

将 CT 图片三维重建出来的立体骨笛图像以 IGS 格式输出，这样可以清楚地看到骨笛的内部结构、内外壁形态、音孔大小与音孔间距离，为描绘骨笛内外壁曲线等奠定基准，然后将其导入 PRO/Engineer Wildfire 4.0。

4.3　根据数据文件建立拉抻平面

因为骨笛本身是由鸟类肢骨加工而成，所以很难用工业设计当中的标准化对称或旋转等方法进行简化修复，只能采取描点勾勒的方式来构造骨笛曲面。为此我们首先在 TOP 系统平面上拉伸了 10 个平面作为横剖骨笛横断面，用来勾勒内外壁曲线。这 10 个平面的选取主要依据骨笛外形的变化和破损的程度来决定，变化较大的部位一般选取的界面间隔较小，这样可以保证生成的曲面能够更加符合原骨笛的曲面走向。对决定复原精度的另一重要因素——横截面的数量和位置，我们做了 10 个。这 10 个横断面外加两个自由的端口控制曲线所控制的一侧桶壁曲面完全能够把误差控制在毫米级别。

4.4　外壁曲线描绘

由于骨笛走向不是一条标准曲线而是一条形状不规则且不在一个平面上的弧形，所以不能用 PRO/Engineer Wildfire 4.0 已有的系统平面平移得到，必须靠手工拉伸才能获得这种特殊的弧状曲面。我们分别在 TOP 和 RIGHT 投影面上比照导入图像草绘出两个略有弧度的纵剖面作为 8 条内外壁勾勒曲线的基础。当绘制完横轴两个方向的剖面后，依次显示各个剖面，并依据拉伸曲面的不透明性，在各个剖面上绘制紧贴导入图形的勾勒曲线。在勾勒时我们充分考虑了 M494：2 骨笛的破损部分，在破损处留出控制点的自由度，以便为以后计算机进行曲率计算分析修复提供可能。

4.5　内壁曲线描绘

在绘制内壁曲线时，首先要将图像放大 20 倍以上，以便在外壁导入图像间隙处看到内壁导入图像。绘制内壁曲线的方法与绘制外壁一样，但要更加仔细，因为内壁曲线绘制的精确与否直接影响到音高。

在绘制曲线时，点的选取不是越多越好，而是要根据形状的复杂程度来确定。形状复杂的描点要多，破损处的描点与控制点也要多，以便充分反映外形曲率，为以后修改时为点的取舍做准备。绘制曲线时还要注意曲线连接处的边界条件的设置，如横向曲线的连接处要相切，横向曲线与纵向曲线要结合等。曲线绘制完成后，再用曲率梳对曲线进行计算分析并做相应控制点和取舍和调整，对曲率变化较大的地方进行分析判断，例如对破损处的曲率调整就按光顺性原则调整至光滑为止。

4.6　绘制音孔

在依次根据造型曲线让计算机根据边界曲面和混合曲面条件生成内外壁和端面后，再用拉伸剪裁方法在导入图像的标记下绘制生成音孔。绘制音孔的尺寸基准是结合导入图像和 CT 测量数据两方面考虑确定的，这样可以更精确地控制音孔的位置和大小。

4.7　观察修改

骨笛实体绘制完成之后，以 STL 文件副本格式保存并观察复制效果，经与原物及 CT 图像比照后，对不合适的地方则返回原文件对曲线再做适当调整，直到效果满意为止。最终完成的骨笛修复，其三维重建模型如封三，3。由该照片可见，原骨笛吹口处的缺损以及自吹口至第一出音孔之间的破损处都得到了有效修复。

5. 固化成型

将基于 PRO/Engineer Wildfire 4.0 三维重建出的骨笛模型用 STL 文件副本格式保存，输入到激光快速成型机上。

封三，4A 在计算机的控制下分层固化，得到用 PRO/Engineer Wildfire 4.0 三维重建的 M494：2 骨笛的复原品。该复原品不仅

在几何形状与物理尺寸上与骨笛实物（封三，4B）非常接近，而且原破损部位也得到了有效修复。

三、测　音

测音时间：2009 年 4 月 14 日 21：45 ~ 22：15。室温：20℃。录音工具：东芝 2010 笔记本电脑，高灵敏度立体声电容式话筒。录音软件：Cool Edit Pro 2.0。录音采样率为 44.1 KHz，声道为立体声，采样精度 16 位。测音对象：用 Pro/Engineer Wildfire 4.0 重建并经激光快速成型的复原品。吹奏者：方晓阳。吹奏方法：斜吹法。吹奏方式：每个音上下行各吹奏 2 – 3 秒，重复 5 遍，共获得 10 组数据。（表一）测音分析软件：Cool Edit Pro 2.0，取物理音高标记法 A4 = 440Hz（即通用第一国际音高 a′= 440Hz），分析得到用 Pro/E 修复的 M494：2 骨笛复原品从全闭到全开的频率与音高。（表二）

四、讨　论

1. 利用医学影像学和计算机辅助逆向工程设计等手段对骨笛进行复原，可以在很大程度上简化手工复原骨笛时遇到的外形尺寸复原难度大，内腔尺寸无法测定的困难，降低复原过程中多种不可控变量的干扰，使得复原所需的成本降低，复原精度提高。根据对 mimics 三维重建模型、Pro/E 三维重建模型以及贾湖骨笛实物的比较分析，可以发现利用医学影像学和计算机辅助逆向工程设计手段复原出的“骨笛”与原骨笛在几何形状与物理尺寸上误差很小，可视为骨笛原物的精确拷贝，在难以用贾湖骨笛实物进行测音研究的现实情况下，可以考虑用本实验制成的精确复制品替代贾湖骨笛实物进行音律学研究。

2. 利用医学影像学和计算机辅助逆向工程设计等手段对破损骨笛进行虚拟修复，

表一　　**用 Pro/E 修复 M494：2 骨笛测音数据（单位 Hz）**

发音孔位	下行	上行	下行	上行	下行	上行	下行	上行	下行	上行
筒音	661.42	665.66	660.03	661.86	662.99	661.35	664.03	661.59	661.24	662.64
开 1 孔	760.96	757.17	757.26	755.78	759.49	752.99	757.32	754.45	755.72	750.21
开 2 孔	843.51	850.03	839.21	843.07	846.98	839.18	843.19	836.33	843.35	837.91
开 3 孔	910.12	908.89	906.48	904.81	902.25	900.95	907.57	899.4	905.41	896.96
开 4 孔	1021.1	1017.7	1011.6	1011.4	1014	1009.9	1019.5	1010	1018.3	1009.9
开 5 孔	1147.3	1132.4	1131.3	1125.6	1133.7	1125.8	1145.7	1129.6	1135.1	1121.7
开 6 孔	1246.9	1233.8	1242.3	1220.3	1230.6	1232.1	1248.4	1210.7	1244	1208.9
全开	1397.6	1372	1380.2	1368	1376.1	1363.9	1392.1	1357.2	1382.9	1345.5

表二　　**用 Pro/E 修复的 M494：2 号骨笛全开到全闭的频率与音高**

发音孔位		筒音	开 1 孔	开 2 孔	开 3 孔	开 4 孔	开 5 孔	开 6 孔	全开
上下行发音均值	频率（Hz）	662.28	756.14	842.28	904.28	1014.34	1132.82	1231.80	1373.55
	音高	E5 + 7	F#5 + 37	G#5 + 24	A5 + 47	B5 + 45	C#6 + 37	D6 + 83	E6 + 70

可使对文物本身的修复与研究从必须接触实物转向不必接触实物，基本摆脱了文物本身对修复与研究工作的束缚，且具有无损、可逆、周期短、多次修复、材料易得、可再处理等特点，值得文物考古界在其它文物的修复中作进一步探索与实践。

3. 利用医学影像学和计算机辅助逆向工程设计等手段不仅可以对骨笛进行虚拟修复，而且还可以将简单的文物修复扩展为对文物的虚拟拆分与虚拟重组。这种方法可以对一些由多个零件组合成的文物进行虚拟拆分与重组，在不损坏文物的前提下实现多角度的立体拼合组装或分解研究。

（感谢河南省文物考古研究所、武警河南总队医院放射科与 Materialise 公司上海办事处对本研究的大力支持。）

［1］ 萧兴华．中国音乐文化文明九千年—试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义．音乐研究，2003，(1)．

［2］ 李寄萍．骨笛仿古实验及分析推测．天津音乐学院学报，2005，(2)：13~17.

［3］ 孙毅．舞阳贾湖骨笛音响复原研究．中国音乐学，2006，(4)：5~12. 孙毅．舞阳贾湖骨笛音响复原研究．硕士论文．

［4］ Fang xiaoyang, Wang changsui, Shao qi, Pan weibing, Han qinyuan, Restoration of Bone Flute from Jiahu Site by using CT (Abstract), 37th International Symposium on Archaeometry, 12-16 May 2008, Siena Italy

（责任编辑：方燕明）

（上接 21 页） 加固、提取和保护处理。

2. 本次提取的两件戈均有铭文。其中第 5 过洞出土的戈，内的一面刻有笔画为点状的铭文“七年相邦吕不韦造寺工周丞义工同”，另一面铸有“寺工”。第 7 过洞出土的戈，内的一面刻“十年寺工丞杨工造”，另一面铸有“寺工”。这两件戈上纪年是秦始皇的纪年，兵马俑坑内出土有铭文“相邦吕不韦”最晚为秦始皇七年。十年吕不韦因参与嫪毐的叛乱而被免去相邦职务，此后再不见有相邦督造兵器的铭文出现，此次“十年”戈的出土证实了这一历史事件的可靠性和由此产生的兵器督造刻铭体例的变化。

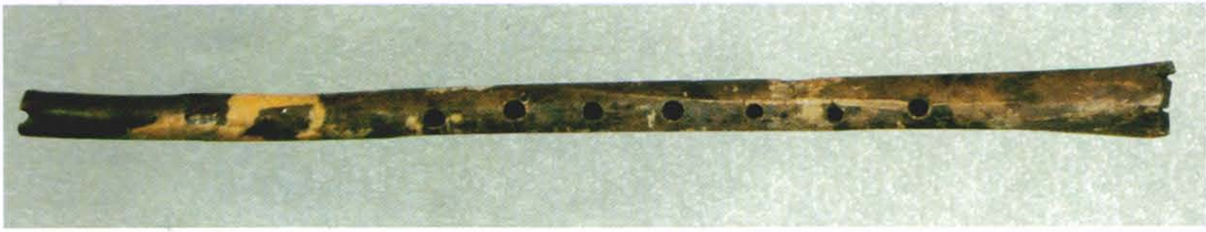
3. 秦陵一号铜车马上发现有银质弩辄，形制与这次一号坑第 6 过洞内②号车左前部发现的弩辄完全相同。一号坑内弩辄的首次发现不仅对其使用及与车辆之间关系的研究提供了考古学实物资料，而且对于研究一号坑中心位置的 G6 在整个军阵中的地位和作用提供了新的线索。

4. 一号坑前五方出土两件甬钟，分别位于第 5 和第 9 过洞。此次提取的两件甬钟则都出土于第 5 过洞，且钟旁均有鼓的遗迹。后五方其他车迹旁没有发现甬钟，其中第 7 过洞内⑤号车旁仅发现鼓迹。联系到第 5 过洞位于一号坑的中部，这无疑说明第 5 过洞在整个一号坑中有着非常特殊的地位，在整个一号坑的指挥系统中也应该有着非常特殊的意义。

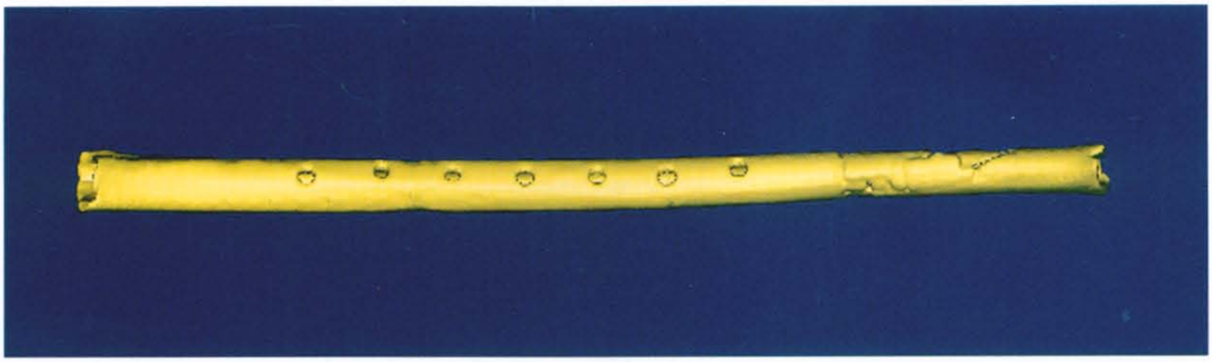
这次清理工作不仅为秦俑秦文化的历史学、考古学研究提供了资料，而且经过专业文物保护人员的保护处理，这批文物的安全性和保存环境将得到极大的改善。当然，本次提取的文物只是目前一号坑内暴露出来的一部分，还有大量的堆积没有清理和发掘。随着今后考古和文物保护工作的进一步开展，秦始皇兵马俑坑内有关器物、军阵、秦代历史学和考古学的研究以及文物保护技术必将会取得更多的成果和进展。

发掘：刘占成　邵文斌　王　煊
　　　张　军
整理：邵文斌　刘占成　蒋文孝
绘图：吴红艳　扈晓梅
执笔：邵文斌　刘占成　蒋文孝

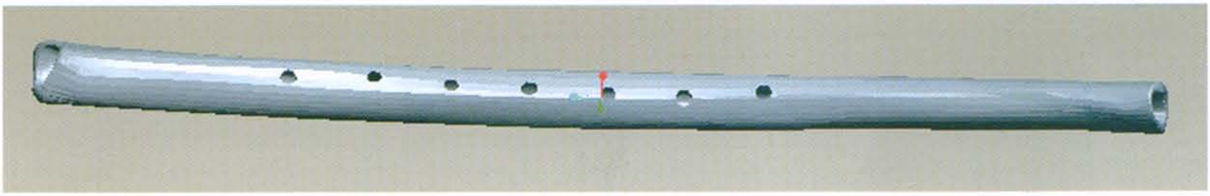
（责任编辑：辛　革）



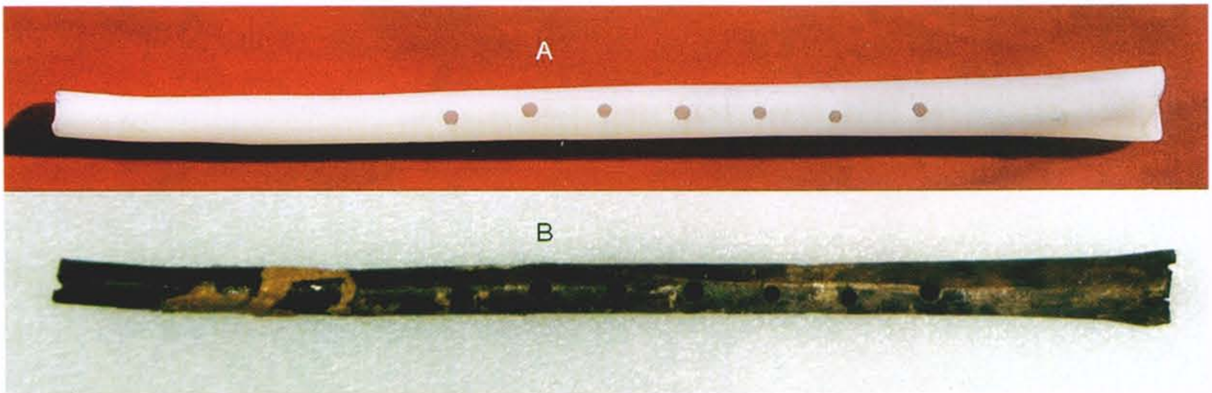
1.M494：2骨笛



2.基于mimics软件的M494：2骨笛三维重建模型



3.利用Pro/Engineer Wildfire 4.0重建M494：2骨笛的三维模型



4.A.基于Pro/Engineer Wildfire 4.0 三维重建的M494：2骨笛的复原品
B.M494:2骨笛实物

贾湖骨笛复原新技术研究